

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FIN DE CARRERA

Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea



E.U.I.T.I.Z.

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

NOMBRE DE ALUMNO

MARÍA VALLEJO CIRIA

ESPECIALIDAD

MECÁNICA

DIRECTOR DE PROYECTO

MARÍA ANTONIETA MADRE SEDILES

CONVOCATORIA

SEPTIEMBRE 2011

INDICE

1.	Presentación y objeto del estudio	2
2.	Parte teórica.....	3
2.1.	Clasificación de los aceros atendiendo a su composición química.....	3
2.1.1.	Aceros sin alear	3
2.1.2.	Aceros aleados	3
2.2.	Tratamientos térmicos	6
2.2.1.	Recocido.....	6
2.2.2.	Normalizado	16
2.2.3.	Temple.....	19
2.2.4.	Revenido.....	24
2.3.	Ensayos.....	27
2.3.1.	Ensayos de dureza	27
2.3.2.	Ensayos de metalografía	29
3.	Parte experimental.....	36
4.	Conclusiones	56
5.	Bibliografía y documentación	57



1. Presentación y objeto del estudio

Este trabajo está enfocado a la investigación de las transformaciones que suceden en varios aceros sometidos a diferentes tratamientos térmicos cuyo fin es mejorar sus propiedades mecánicas. Estos tratamientos térmicos son conocidos como: recocido, temple y revenido. Las mejoras, o modificaciones de las propiedades, además de ser medidas en los ensayos propios de las características, quedan reflejadas en la estructura metalografía, y es aquí donde se encuentra la explicación a este aumento, o disminución, de las propiedades mecánicas.

Todos los tratamientos empleados consisten en un calentamiento a temperatura variable, un tiempo de mantenimiento a dicha temperatura y un adecuado enfriamiento. El recocido es un tratamiento térmico que depende de los resultados que deseemos obtener, debemos de utilizar diferentes temperaturas de calentamiento, diferentes tiempos de mantenimiento y diferentes modos de enfriamiento. En el temple la temperatura debe ser suficientemente elevada seguida de un enfriamiento suficientemente rápido. El calentamiento tiene por objeto modificar la estructura, para conseguir modificar el tamaño del grano y con ello la dureza del material. El revenido se da a los materiales que han sido sometidos a un temple y tiene dos funciones principales: eliminar las tensiones, y aumentar la tenacidad.

El objeto de este estudio es valorar las condiciones más adecuadas de los tratamientos térmicos de entre las consideradas, mediante comparación de resultados de los ensayos realizados, en ambos aceros. Por una parte tenemos un acero al carbono F-1140 y por la otra un acero aleado F-1252.



2. Parte teórica

2.1. Clasificación de los aceros atendiendo a su composición química.

La clasificación según la composición química, tal como especifica la normal europea EN 10020, establece dos grupos:

2.1.1. Aceros sin alear

Los aceros al carbono son muy satisfactorios en cuanto a la resistencia en cambio para otros requisitos nos son muy severos. Estos aceros se utilizan también con todo éxito a las temperaturas comunes y en atmosferas que no son altamente corrosivas, pero su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. Casi todos los aceros endurecidos se revienen para reducir las tensiones internas. Los aceros al carbono muestran una marcada suavidad con el incremento de la temperatura de revenido. Este comportamiento disminuirá su aplicación para piezas que requieren dureza por arriba de la temperatura ambiente. La mayoría de las limitaciones de los aceros al carbono pueden vencerse mediante el uso de elementos de aleación.

2.1.2. Aceros aleados

Un acero aleado puede definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono. Aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de manganeso y silicio que no se consideran aleados, porque la función principal del manganeso y del silicio es actuar como desoxidadores. Ambos se combinan con el oxígeno y con el azufre, para reducir el efecto nocivo de dichos elementos.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, entre los cuales los más importantes son:

1. Aumentar la templabilidad.
2. Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
3. Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como a bajas temperaturas.
4. Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
5. Aumentar la resistencia al desgaste.
6. Aumentar la resistencia a la corrosión.
7. Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos de aleación pueden calificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyan en los dos constituyentes principales de un acero recocido.

Grupo 1: Elementos que se disuelven en ferrita.

Grupo 2: Elementos que se combinan con carbono para formar carburos simples o complejos.

Efecto de los elementos de aleación en la ferrita: Desde el punto de vista técnico, probablemente hay alguna solubilidad de todos los elementos de la ferrita, pero ciertos elementos no se encuentran extensivamente en la fase carburo. De esta manera el níquel, el aluminio, el silicio, el cobre y el cobalto se hayan ampliamente disueltos en ferrita. En ausencia de carbono, se encontrarán disueltas en ferrita grandes proporciones de elementos del grupo 2; por lo tanto, la tendencia a formar carburos es obvia sólo cuando hay gran cantidad de carbono. El comportamiento relativo de los elementos individuales, y la tendencia relativa de ciertos elementos a existir en ambos grupos se indica por el tamaño de la punta de las flechas, algunos de esos elementos son: manganeso, cromo, tungsteno, molibdeno, vanadio y titanio.

Cualquier elemento disuelto en ferrita aumenta su dureza y su resistencia de acuerdo con los principios generales del endurecimiento por solución sólida.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

El orden de incremento de efectividad en hierro reforzado, basada en adiciones iguales por peso, parece ver como sigue: cromo, tungsteno, vanadio, molibdeno, níquel, manganeso y silicio. El efecto de endurecimiento de los elementos disueltos es realmente insignificante en la contribución del reforzamiento de la ferrita a la resistencia total del acero. La influencia del cromo para modificar la resistencia cambiando la estructura, en tanto que la curva inferior indica la menos influencia del cromo en estructuras esencialmente constantes.

Efecto de los elementos de aleación en el carburo: La influencia de la cantidad de carburo, la forma y la dispersión del carburo en las propiedades del acero. Como todos los carburos encontrados en los aceros son duros y frágiles, su efecto en las propiedades es análoga, sin importar la composición específica.

La presencia de los elementos que forman carburos influyen en la temperatura de endurecimiento, y el tiempo necesarios para obtener un calentamiento total y uniforme. Los carburos son lentos de disolver y tienden a no disolverse en austenita. Esto hace que disminuyan los contenidos en carbono y en la aleación de la austenita con una cantidad por debajo de la cual tiene un acero en general. Los carburos no disueltos también actúan para reducir el crecimiento de grano. Ambos efectos tienden a reducir la templabilidad. Cuando están disueltos en austenita, los elementos que forman los carburos favorecen grandemente el endurecimiento profundo.

Aunque todos los carburos encontrados en el acero son compuestos duros y frágiles, los carburos de cromo y vanadio resultan excepcionales en dureza y resistencia al desgaste. La dureza y al resistencia al desgaste de los aceros aleados ricos en carburos se determinan en gran medida la cantidad, el tamaño y la distribución de estas partículas duras. A su vez, estos factores son controlados por la composición química, el método de manufactura y el tratamiento térmico.



2.2. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma, se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces hay también cambios en la composición del metal.

Los tratamientos térmicos más usados son: recocido, normalizado, temple y revenido

2.2.1. Recocido

Con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es ablandar el acero; otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consisten en calentamiento a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos. Hay diferentes tipos de recocido, en función de las características del material de partida y de la finalidad que se busca. Algunos de los más comunes son:

a) Recocido de homogeneización.

Se realiza sobre unos lingotes de acero para destruir la heterogeneidad química que se origina durante la solidificación, como segregaciones de diversos elementos.

La temperatura del calentamiento es muy elevada: $A_{c3}+200^\circ$ o mayor para facilitar la difusión de los elementos químicos. Hay que tener cuidado no superar la línea de liquidus que produciría acero quemado.

Después de este recorrido se obtiene un acero que hay que regenerar

b) Recocido de regeneración.



Este tratamiento se realiza a los aceros sobrecalentados, de grano grueso, para afinar el tamaño de grano; en algún caso también se utiliza para destruir la estructura de un tratamiento mal efectuado. Consiste en un calentamiento a temperaturas ligeramente superiores a A_3 o A_1 , según sea el acero hipoeutectoide o hipereutectoide (aproximadamente, A_{3+50° ó A_{1+50°) manteniendo a esa temperatura para transformar el metal en austenita y un enfriamiento muy lento, generalmente en el interior del horno, para transformar la austenita en los componentes más estables, siguiendo el diagrama de equilibrio, de manera que la estructura final es de ferrita y perlita o perlita y cementita, dependiendo del tipo de acero.

Para disminuir el tiempo de enfriamiento, es posible un primer enfriamiento en el interior del horno hasta una temperatura inferior a A_1 (generalmente unos 500°), donde toda la austenita se habrá trastornado ya. A partir de ese valor se puede continuar el enfriamiento al aire.

c) Recocido de globulización.

Este recorrido se da fundamentalmente a los aceros de herramientas y a otros aceros aleados de contenido en carbono con el fin de dejarlos en las mejores condiciones de maquinabilidad y mínima dureza.

Este tratamiento se realiza calentando a temperaturas ligeramente inferiores a A_1 , o calentando a temperaturas algo superiores a A_1 , o por recocidos a temperaturas variables y oscilantes por encima y por debajo de A_1 . El enfriamiento se realiza con velocidades lentas, aproximadamente de 10 a $25^\circ/\text{hora}$. La estructura que se obtiene de esta manera está constituida por pequeñas partículas esferoides de cementita y otros carburos, dentro de una matriz de ferrita.

d) Recocido a ablandamiento para mecanizar piezas que se han sometido a tratamiento térmico.



Algunos aceros quedan con durezas tan elevadas que es difícil su mecanización. Para ablandarlos se suele realizar este recocido, que consiste en calentar las piezas a temperaturas algo inferiores a A_1 , dejando después enfriar la pieza al aire. Con este tratamiento no se obtienen las menores durezas, pero en muchos casos, las que se consiguen son suficientes para canalizar perfectamente los materiales.

Este recocido tiene la ventaja de ser un tratamiento muy sencillo, rápido y económico. No exige un enfriamiento tan controlado como en los dos casos anteriores.

Se suele utilizar para ablandar aceros de gran resistencia, como los aceros Cr-Ni, Cr- Ni-Mo, Cr- Mo etc., en los que el recocido de regeneración duraría un tiempo muy elevado.

e) Recocido de recristalización.

Los aceros que han sido estirados o laminados en frío se endurecen y pierden tenacidad.

Si estos procesos se repiten varias veces de forma sucesiva el material se deforma que se vuelve excesivamente duro y frágil, rompiéndose con facilidad. El acero adquiere tal acritud que no se puede seguir deformando sin peligro de rotura. Para seguir deformando hay que devolver el material sus características iniciales de ductilidad y maleabilidad. Esto se consigue mediante el recocido contra acritud.

Consiste en un calentamiento a temperaturas entre 500 y $A_1 - 75^\circ$, según la composición del acero, seguido de un enfriamiento al aire o dentro del horno si se quiere se evita la oxidación.

En el recocido contra acritud, al llegar aproximadamente a los 550° (esta temperatura varía con la composición del acero y el grado de acritud), se produce la recristalización de la ferrita, formando nuevos cristales a expensas de los granos deformados, desapareciendo la acritud y recobrando la ductilidad inicial.



Debido a este efecto este recocido también se conoce como recocido de recristalización.

Después de la recristalización, si continua el aumento de la temperatura se produce el crecimiento de los granos formados.

f) Recocido isotérmico.

Este tipo de recocido tiene la ventaja de ser mucho más rápido que los recocidos tradicionales, con enfriamientos muy lentos. Consiste en un calentamiento del acero a temperaturas superiores a A_3 , seguido de un rápido enfriamiento hasta una temperatura ligeramente inferior a A_1 , manteniendo el acero el tiempo necesario para que se produzca la transformación de la austenita. Una vez conseguida se enfría el aire.

Mediante las curvas de las “S” es posible conocer y elegir la temperatura más adecuada de tratamiento para conseguir la microestructura y dureza determinada, así como el tiempo de duración del tratamiento.

El recocido isotérmico tiene especial importancia en las piezas forjadas, ya que no es necesario un recocido clásico que tenga que recalentar la pieza y enfriar el horno, sino que directamente de la forja, y antes de que descienda la temperatura, se introducen en un baño de sales. Se mantiene el acero durante un cierto tiempo, dependiendo de la composición y el tamaño de la pieza, en el baño y se enfría al aire, siendo un proceso mucho más rápido que los recocidos de enfriamiento continuo.

El proceso del *recocido de regeneración* tiene ciertas semejanzas con el *temple* y el *normalizado*. Para estos tres casos se calienta el acero a temperatura ligeramente superior a la crítica, y luego, después de un periodo de permanencia a esa temperatura, suficiente para conseguir el estado austenítico, se enfrían las piezas. El enfriamiento es diferente en los tres casos. En los *recocidos*, se hace muy lentamente dentro del horno. En los *temples*, se hace muy rápidamente



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

enfriando en agua y aceite, etc., y en los normalizados el enfriamiento se efectúa al aire a una velocidad intermedia entre los *temples* y *recocidos*. Se puede decir que la velocidad de enfriamiento es lo que caracteriza y diferencia principalmente estas tres clases de tratamientos.

Hay que distinguir en estos tres periodos fundamentales: 1- Calentamiento; 2- Permanencia a temperatura, y 3º, enfriamiento. Las dos primeras fases se pueden estudiar a la vez para las tres, pues las variantes que pueden existir son pequeñas.

Calentamiento para el recocido de regeneración, temple y normalizado

Es la primera fase de todo tratamiento térmico y aunque algunas veces no se le suele dar importancia, tiene, sin embargo, suficiente para que haya que dedicarle cierta atención, sobre todo cuando se trata de perfiles y piezas de bastante espesor. Las piezas de poco espesor y de formas sencillas se pueden introducir directamente en los hornos calientes a alta temperatura 750° a 860°, pero en el caso de piezas gruesas hay que tomar precauciones que explicaremos a continuación. En las piezas gruesas el calentamiento ha de procurarse que sea lo más uniforme posible y debe llegar hasta el corazón de la pieza. Debe hacerse lentamente para que haya menos diferencia de temperatura entre el interior y la periferia, pues en caso contrario se pueden crear fuertes tensiones internas que pueden dar lugar a grietas y roturas. Algunas veces, estos defectos aparecen luego en los *temples* o *revenidos* y se atribuyen indebidamente a causas distintas de las que los originaron. Estas tensiones se crean primero por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías de las piezas (periferia y centro) y luego por las contracciones que ocurren al atravesar el acero en zonas críticas.

No es recomendable introducir las piezas frías de más de 200 milímetros de diámetro en hornos cuya temperatura sea superior a 350°, porque el acero relativamente frío es poco plástico y las tensiones que se crean pueden originar grietas.



El paso de la zona crítica no es peligroso cuando toda la pieza tiene la misma temperatura o las diferencias en el centro y la periferia, son pequeñas, como ocurre en los calentamientos lentos. En cambio, cuando en las piezas gruesas la periferia sufre una contracción, mientras el centro que no ha llegado a esa temperatura se está dilatando todavía y el peligro de grietas es mayor.

Cuando en el calentamiento, el acero alcanza aproximadamente los 732°, la perlita que contiene, comienza a transformarse en austenita, y cambia la estructura cristalina del hierro de la perlita, pasando de hierro alfa a hierro gamma, y el acero que hasta entonces se estaba dilatando se contrae mientras dura esa transformación, continuando luego otra vez la dilatación.

Los calentamientos rápidos son peligrosos en las piezas gruesas, especialmente en los aceros de alto contenido en carbono, en los que el porcentaje de perlita es grande. En los aceros dulces, en cambio, se pueden utilizar mayores velocidades de calentamiento, ya que en ellos estos fenómenos tienen menos importancia.

Para evitar que las tensiones sean peligrosas, conviene que en las secciones transversales la diferencia de temperatura entre dos puntos de un mismo radio situados a 25 mm de distancia, no sea superior a 20°, y para conseguirlo, la duración del calentamiento desde la temperatura ambiente a los 850°, debe ser superior a media hora por pulgada de diámetro, y si es posible conviene que al duración del calentamiento sea una hora por pulgada de diámetro.

La transmisión del calor en los aceros de alta aleación, como los rápidos, inoxidables, indeformables de 13% de cromo,.... Se hace mucho más despacio que en los ordinarios, por lo que la duración del calentamiento deberá ser aproximadamente el doble que el necesario para los aceros al carbono o de baja aleación.



El estado de la superficie del material tiene también gran influencia en la duración del calentamiento, existiendo por esa circunstancia diferencias muy notables entre los tiempos necesarios para conseguir un correcto calentamiento de barras o perfiles de diferentes estados superficiales. Cuando se trata de superficies brillantes, la duración del calentamiento es unas dos o tres veces mayor que cuando trata de superficies rugosas u oxidadas.

Temperaturas convenientes para el recocido, temple y normalizado de los aceros hipoeutectoides al carbono y aleados con austenización completa

En estos tratamientos hay que alcanzar una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, para conseguir que todo el acero pase al estado austenítico. En general, el *normalizado* se suele hacer a temperatura un poco más alta que los otros dos tratamientos, de 50° a 70° por encima de la temperatura crítica. El *temple* de 40° a 60° y el recocido de 20° a 40° por encima de la temperatura crítica.

Duración del calentamiento (permanencia a temperatura en los recocidos de regeneración, temple y normalizado)

Para conseguir que toda la masa del acero esté formada por cristales de austenita, hace falta que el acero permanezca a la temperatura de tratamiento un determinado tiempo.

La duración del calentamiento en los *recocidos*, *temple* y *normalizados*, depende de la masa de las piezas, de la temperatura, de la velocidad de calentamiento, de la clase de acero y del estado inicial y final del material.

El tiempo de mantenimiento del acero a la temperatura de tratamiento comienza cuando toda la pieza, incluyendo las zonas del interior, ha alcanzado esa temperatura. Aunque al rebasar el acero las temperaturas A_{c3} , todo el carbono forma solución con la austenita, unas regiones de austenita pueden tener más carbono que otras. Entonces el porcentaje de carbono tiende a igualarse en toda la masa, pero esta tendencia puede ser retardada por las segregaciones no



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

metálicas que forman barreras entre los granos, por el fósforo y el oxígeno que se encuentran en solución y que parece que tienden a repeler al carbono, o por la presencia de elementos aleados como cromo, wolframio, etc., que tienden a formar carburos complejos. Como la difusión del carbono es mucho más rápida a alta temperatura, para reducir el tiempo de calentamiento podría efectuarse el tratamiento a temperaturas muy superiores a la crítica, pero como estos calentamientos dan lugar a un gran crecimiento de los cristales, generalmente se prefiere prolongar un poco su duración y efectuarlo a temperaturas relativamente bajas.

Cuando el material alcanza la temperatura de austenización ocurre que aunque toda la estructura sea ya totalmente austenítica, en los primeros momentos todavía la austenita no es completamente homogénea. En los aceros hipoeutectoides hay zonas que anteriormente eran de ferrita y que al ser austenizadas en los primeros momentos son bajas en carbono y en los aceros hipereutectoides hay zonas que anteriormente eran de carburos y luego cuando alcanzan altas temperaturas tienen en un principio alto contenido de carbono. En los aceros hipoeutectoides conviene que transcurra algún tiempo para que el carbono se difunda en las zonas que anteriormente fueron ferríticas.

Cuando se calientan con austenización incompleta los aceros hipereutectoides, la austenita que se encuentra junto a los carburos, tiene en general siempre un porcentaje de carbono superior al resto.

El tiempo necesario para obtener una estructura de austenita homogénea, varía con la máxima temperatura alcanzada y con las particulares características de la microestructura inicial. Cuanto más alta sea la temperatura que se alcanza, menos tiempo es necesario para homogeneizar la microestructura.

Si el calentamiento ha sido bastante rápido, el tiempo de permanencia deberá ser grande; en cambio, si la primera fase del calentamiento hasta alcanzar la temperatura conveniente ha sido larga, el tiempo de permanencia puede ser menos, ya que la penetración del calor habrá sido mejor y la última fase del



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

calentamiento puede considerarse casi como parte de la permanencia a temperatura.

La duración del calentamiento depende también de la clase de tratamiento. En los normalizados se recomienda usar permanencias más cortas que en los otros casos. Los recocidos, en cambio, suelen ser más prolongados, pues muchas veces hay que conseguir no sólo la formación del estado austenítico, sino también la difusión y homogeneización de todos los constituyentes, que a veces, sobre todo en los aceros de fuerte aleación, exige mucho tiempo.

En general, para estos tratamientos, el tiempo de permanencia oscila entre media hora y una hora por pulgada de espesor. Para procesos de calentamiento, cuya duración es de una hora por pulgada y diámetro suelen utilizarse permanencias a temperatura de tratamiento de media hora por pulgada, y para procesos cuya duración es de media hora por pulgada, permanencias de una hora por pulgada.

Crecimiento de los cristales de austenita con el calentamiento

Si el acero es mantenido durante bastante tiempo a temperatura más elevada que la crítica superior, los cristales de austenita tienen tendencia a desarrollarse y aumentar de tamaño. Esta tendencia aumenta cuanto más alta sea la temperatura y mayor la duración del calentamiento. Por lo tanto, si se mantiene el acero bastante tiempo temperatura superior a A_{c3} , obtendremos cristales bastos de austenita, y como el tamaño de los cristales de acero al terminar del tratamiento dependen precisamente del tamaño que tuvieron los cristales de austenita, obtendremos, después de un tratamiento a elevada temperatura una estructura vasta y un acero de bajas características.

Cuando en el calentamiento de un acero se llega a la zona crítica, se produce siempre la recrystalización y nacen nuevos cristales de austenita con el mínimo tamaño que se puede conseguir con esa clase de acero. Luego cuando en los procesos de calentamiento se sobrepasa la temperatura crítica A_{c3} , el tamaño



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

de cristales de austenita aumenta y su crecimiento depende, como hemos dicho antes, de la temperatura alcanzada y el tiempo de permanencia.

Por eso cuando por cualquier circunstancia tenemos un acero de grano grueso, para afinarlo basta con calentarlo a una temperatura lo más justo por encima de la crítica y luego enfriarlo más o menos rápidamente al aire según la composición. En el enfriamiento al aire los granos de austenita se transforman en otros más pequeños de ferrita o cementita y perlita, sorbita o troostita según la composición.

Estudio de la velocidad de enfriamiento en el recocido de regeneración con austenización completa.

Los recocidos de regeneración con austenización completa se caracterizan por ser tratamientos de ablandamiento, con los que los aceros quedan con estructuras perlíticas. De un modo general se puede decir que si en el recocido se calientan los aceros hasta la austenización completa después del enfriamiento lento se obtienen estructuras laminares.

En esta clase de recocidos para comenzar el enfriamiento es necesario que toda la masa del acero este formada por pequeños cristales de austenita. Luego el enfriamiento debe ser lento para conseguir que el acero quede blando. Cuanto más lento sea el enfriamiento, más blando queda el material.

Efectuando una serie de ensayos con aceros de diversas composiciones, se puede observar que si aumenta la velocidad de enfriamiento aumenta la dureza y hay una cierta velocidad que no se puede rebasar, porque entonces el acero quedara demasiado duro y el recocido no será aceptable.

En el enfriamiento, en el momento en el que la temperatura del acero llega a la crítica, la austenita comienza a transformarse en otros constituyentes.

En el clásico diagrama hierro/carbono se señalan las temperaturas de transformación teóricas, es decir, las correspondientes a calentamientos o



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

enfriamientos infinitamente lentos. Como en la práctica, esto no se consigue, pues en los recocidos industriales se utilizan velocidades de 10°C, 20°C, 30°C, 50°C y 100°C a la hora, los puntos críticos en el enfriamiento se suelen representar a temperaturas un poco inferiores a las señaladas en el citado diagrama, efectuándose, por lo tanto, la transformación de la austenita a temperaturas más bajas que las teóricas.

Terminación del recocido

El acero se puede sacar del horno cuando todos los cristales de austenita han sido completamente ya transformados en constituyentes perlíticos blandos, es decir, cuando se ha rebasado completamente el punto Ar_1 en el enfriamiento.

La temperatura de aparición de este punto crítico depende de la composición y velocidad de enfriamiento. Si el enfriamiento se hace con una velocidad de enfriamiento de 10°C/hora, la aparición del punto crítico en un acero al carbono, por ejemplo, ocurre aproximadamente a 700°C y la transformación completa tiene lugar en el intervalo de 680 a 700°C. En cambio, si el enfriamiento se hace a una velocidad de 20°C/hora, la transformación total de la austenita se hace, en menos tiempo, pero se realiza a temperaturas de 680-650°C, inferiores a las señaladas anteriormente. Esto nos fija las temperaturas finales del recocido, a partir de las cuales el acero se podrá sacar al aire sin peligro que endurezca. Esas temperaturas serán de 600 a 650°C, en cambio en los aceros aleados será de 500 a 650°C, pues si se enfrían lentamente solo hasta 680°C y luego al aire, entonces parte de la transformación puede efectuarse rápidamente, y el material quedará duro.

2.2.2. Normalizado

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma, se deja el acero con una estructura y propiedades arbitrariamente



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

se consideran como normales y características de su composición. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos, y también sirve para destruir los efectos de un tratamientos anterior defectuoso. Por medio del normalizado, se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Se emplea casi exclusivamente para los aceros de construcción al carbono o de baja aleación.

El proceso del *normalizado* tiene ciertas semejanzas con el *temple* y el *recocido de regeneración*. Para estos tres casos se calienta el acero a temperatura ligeramente superior a la crítica, y luego, después de un periodo de permanencia a esa temperatura, suficiente para conseguir el estado austenítico, se enfrían las piezas. El enfriamiento es diferente en los tres casos. En los *recocidos*, se hace muy lentamente dentro del horno. En los *temple*s, se hace muy rápidamente enfriando en agua y aceite, etc., y en los normalizados el enfriamiento se efectúa al aire a una velocidad intermedia entre los *temple*s y *recocidos*. Se puede decir que la velocidad de enfriamiento es lo que caracteriza y diferencia principalmente estas tres clases de tratamientos.

Hay que distinguir en estos tres periodos fundamentales: 1- Calentamiento; 2- Permanencia a temperatura, y 3º, enfriamiento. Las dos primeras fases se pueden estudiar a la vez para las tres, pues las variantes que pueden existir son pequeñas. Todo esto queda explicado en el *recocido* a excepción del enfriamiento.

Teoría del normalizado. Enfriamiento.

El normalizado es uno de los tratamientos térmicos más fáciles de efectuar. Se utiliza lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación, forja o en otras operaciones posteriores. Como el nombre indica, se da este tratamiento a los aceros para que queden con los constituyentes y características que puedan considerarse normales o propios de su composición.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

Se efectúa no sólo después de la forja o laminación, sino también después de ciertos sobrecalentamientos o enfriamientos hechos en malas condiciones y siempre que se quiere destruir los efectos de cualquier calentamiento o tratamiento anterior.

Consiste en calentar los aceros a una temperatura superior a la crítica A_{c3} , para que pasen al estado austenítico y dejar luego enfriar las piezas al aire tranquilo. En el normalizado, la velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido. Es un tratamiento típico de los aceros al carbono de construcción de 0,15 a 0,40 % de C y rara vez se emplea en los aceros de herramientas, ni en los aleados de construcción. Las temperaturas del normalizado recomendadas para estos aceros son las que se señalan en la siguiente tabla.

Composición % de C	Temperatura en °C
0,10	935°
0,20	910°
0,30	880°
0,40	860°
0,50	840°

El espesor de las piezas ejerce bastante influencia en los constituyentes y características que se obtienen en el normalizado de los aceros.

Es distinta la microestructura que se obtiene en uno redondo de acero de 8mm de diámetro de 0,45% de carbono, que en otro de 250 mm de diámetro de la



misma composición, debido a que la velocidad de enfriamiento, que es la que en definitiva regula el tratamiento, es bastante diferente en ambos casos.

2.2.3. Temple

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio convenientemente, agua, aceite.etc.

El proceso del *temple* tiene ciertas semejanzas con el *recocido de regeneración* y el *normalizado*. Para estos tres casos se calienta el acero a temperatura ligeramente superior a la crítica, y luego, después de un periodo de permanencia a esa temperatura, suficiente para conseguir el estado austenítico, se enfrían las piezas. El enfriamiento es diferente en los tres casos. En los *recocidos*, se hace muy lentamente dentro del horno. En los *temples*, se hace muy rápidamente enfriando en agua y aceite, etc., y en los normalizados el enfriamiento se efectúa al aire a una velocidad intermedia entre los *temples* y *recocidos*. Se puede decir que la velocidad de enfriamiento es lo que caracteriza y diferencia principalmente estas tres clases de tratamientos.

Hay que distinguir en estos tres periodos fundamentales: 1- Calentamiento; 2- Permanencia a temperatura, y 3º, enfriamiento. Las dos primeras fases se pueden estudiar a la vez para las tres, pues las variantes que pueden existir son pequeñas. Todo esto queda explicado en el *recocido* a excepción del enfriamiento.

Teoría del temple. Enfriamiento

Teóricamente en el temple, lo mismo que en el recocido de regeneración de los aceros hipoeutectoides, toda la masa del acero debe encontrarse en estado austenítico en el momento de comenzar el enfriamiento. Si entonces se enfría el acero con rapidez, todo el material queda con gran dureza y al transformación de



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alear

la austenita ocurre generalmente por debajo de 350°C , o sea, a temperatura mucho más baja que en el recocido.

Sin embargo, en los aceros de herramientas (hipereutectoides) como se ha explicado anteriormente para el temple no se llega a la austenización completa por quedar siempre algunos carburos sin disolver.

Para comprender mejor el fenómeno del temple se puede ensayar un acero de 0.90% de carbono enfriándolo a velocidades variables y observando luego lo que sucede.

Ya hemos visto al estudiar el recocido, que si dejamos enfriar el acero muy lentamente desde una temperatura superior a la crítica, la zona de transformación de la austenita en otros constituyentes, aparece a una temperatura inferior, pero próxima a la teórica (721°), y el acero queda muy blando.

Si aumentamos progresivamente la velocidad de enfriamiento, el punto A_r que señala la transformación de la austenita, aparece cada vez a temperatura más baja. Al aumentar la velocidad, también vemos que la estructura microscópica resultante va cambiando progresivamente.

Cuando la velocidad es muy pequeña aparece perlita gruesa, luego, perlita laminar fina, y cuando la velocidad de enfriamiento es mayor aparece un nuevo constituyente oscuro y difuso, denominado sorbita; al continuar aumentando la velocidad, aparece otro también duro, más oscuro, formando rosetas de aspecto nodular, llamado troostita. También se observa que la dureza obtenida ha ido aumentando paralelamente con los cambios de estructura. Al principio, cuando aparecía perlita, la dureza no pasaba de 10 a 20 Rc, y al enfriarse más rápidamente y obtenerse troostita se llega a 30 y 45 Rc.

Cuando por efecto del rápido enfriamiento el punto A_r desciende hasta las proximidades de 650° - 600° , aparece otro punto de transformación a una temperatura (0 - 350°) mucho más baja que las anteriores, que se denomina A_r''' . A partir de la aparición de esta nueva transformación, al punto A_r se le llama A_r' .



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alear

Durante mucho tiempo se ha denominado a aquel punto Ar'' , pero recientemente y como consecuencia de los estudios realizados sobre la transformación isotérmica de la austenita, se prefiere reservar esa denominación para las transformaciones correspondientes a la zona intermedia entre el punto Ar' y el punto que estamos ahora estudiando.

La aparición de este punto Ar''' corresponde a un gran aumento de dureza (40-67 Rc) y se manifiesta además por la presencia de otro nuevo constituyente en la estructura microscópica: la martensita.

La estructura totalmente martensítica típica de los aceros bien templados, se consigue cuando aparece únicamente el punto Ar''' , y esto ocurre cuando toda la austenita se transforma a baja temperatura generalmente inferior a 350° .

La menor velocidad con la que se obtiene exclusivamente el punto Ar''' se llama velocidad crítica de temple, y es la velocidad que hay que rebasar para conseguir la estructura totalmente martensítica y un temple teóricamente perfecto.



Las temperaturas recomendables para el temple de los aceros al carbono son las que se señalan en la siguiente tabla:

Composición % de C	Temperatura en °C
0,10	925° (Austenización completa)
0,20	900° (Austenización completa)
0,30	870° (Austenización completa)
0,40	840° (Austenización completa)
0,50	830° (Austenización completa)
0,60	810° (Austenización completa)
0,70	780° (Austenización completa)
0,80	770° (Austenización completa)
0,90	770° (Austenización completa)
1,00	760° (Austenización completa)
1,20	760° (Austenización completa)
1,40	760° (Austenización completa)



Necesidad de sobrepasar las temperaturas críticas de austenización en el temple de los aceros hipoeutectoides

Cuando en el temple de un acero de menso de 0.90% de carbono, se inicia el enfriamiento, toda la masa debe encontrarse formando cristales de austenita. Si no cumple esta condición, el temple no será perfecto y no se alcanzará toda la dureza que con ese acero se puede obtener. Si en los aceros de contenido en carbono inferior a 0.90%, no se alcanza una temperatura superior a A_{c3} , quedará algo de ferrita en el acero templado. La estructura martensítica perfecta y la máxima dureza compatible con la composición de un acero hipoeutectoide, sólo se puede conseguir cuando al iniciarse el enfriamiento su estructura es totalmente austenítica, por ser el único constituyente capaz de transformarse en martensita.

Para comprender mejor ese proceso de transformación, vamos a ver qué sucede al temprar tres aceros al carbono de 0,20, 0,30 y 0,45% de C, a diferentes temperaturas.

Las temperaturas críticas teóricas aproximadas, correspondientes al punto A_3 , son $825,790^\circ$ y 760° . Las temperaturas de los puntos A_{c3} son, en cambio un poco más elevadas, 855° , 820° y 790° . Para conseguir un temple perfecto, habrá que calentar el acero a temperaturas ligeramente superiores a estas últimas, pues así se podrán salvar posibles errores de pirómetros, de los operarios o los desiguales calentamientos de los hornos; en la industria se recomienda temperaturas un poco más altas que las A_3 y A_{c3} citadas, y que suelen ser para aceros de 900° , 870° y 840° .

Las resistencias a la tracción de estos aceros, que en estado normalizado son 55,58 y 62 kg/mm^2 , aproximadamente, no se modifican al ser templados a temperaturas inferiores a A_{c1} , y en cambio, templando a temperaturas un poco más altas, aumentan sensiblemente. Un acero con 0,45% de carbono que se ha templado a 732° , es decir, justo a la temperatura en que comienza la transformación A_{c1} . A esa temperatura se ha iniciado la transformación de la perlita en austenita sin llegar a completarse y después del enfriamiento rápido,



los constituyentes resultantes son: martensita, que proviene de la austenita, parte de perlita sin transformar y ferrita proeutectoide. Al sobrepasar la temperatura crítica Ac_1 , toda la perlita que contiene el acero se transforma en austenita y al templar los tres aceros a 750° , por ejemplo, la austenita formada por los antiguos cristales de perlita, se ha transformado en martensita dura, quedando, sin embargo, todavía bastantes cristales de ferrita libre. Después del temple a 750° , se obtienen cristales de martensita y de ferrita y se alcanzan resistencias de 62,70 y 120 kg/mm², respectivamente. El acero de 0,45% de carbono templado a 750° , en el que se aprecia martensita en que se ha transformado la austenita al templar y ferrita sin transformar.

Si efectuamos el temple a 775° , las durezas que se obtiene son mayores que en el anterior: 70, 120, 193 kg/mm², aproximadamente, y también es mayor la proporción de austenita transformada en martensita, y menor la cantidad de ferrita libre que aparece después del temple, que corresponde al mismo acero de 0,45% de carbono templado a esa temperatura; sin embargo, el temple es todavía imperfecto por no haberse conseguido la completa austenización de la masa del acero.

Finalmente, templando cada uno de los aceros a las temperaturas citadas de 855° , 820° y 790° , obtendremos las mayores durezas y resistencias de 122, 170 y 208 kg/mm² y estructuras totalmente martensíticas.

2.2.4. Revenido

Es un tratamiento que se da en las piezas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica Ac_1 , se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando además el acero con la dureza y resistencia deseadas.



Para comprender el fundamento de este tratamiento, es interesante estudiar el efecto que ejerce sobre las propiedades mecánicas del acero y sobre su microestructura.

Comenzaremos estudiando primero la influencia que el revenido ejerce sobre las propiedades de los aceros al carbono templados, recordando que estos aceros después de un temple teóricamente perfecto, están constituidos por cristales de martensita. El acero en esa forma es muy resistente, pero tiene muy poca ductilidad y tenacidad. Si el acero templado se vuelve a calentar a diferentes temperaturas comprendidas entre la temperatura ambiente y 700°C , y después se enfría al aire, la resistencia a la tracción disminuye y al mismo tiempo aumenta la ductilidad y la tenacidad. La resistencia al choque o resiliencia, que es generalmente muy baja cuando el revenido se hace a temperaturas inferiores a 450°C , aumenta en cambio notablemente cuando el revenido se efectúa a temperaturas más elevadas.

Un acero de 0,45% de carbono, por ejemplo, templado en agua tiene aproximadamente una dureza de 550 Brinell y una resistencia de 190 kg por milímetro cuadrado, y después de ser revenido a 300°C , queda aproximadamente con 150kg/mm^2 de resistencia, 7,5% de alargamiento y 3 Kgm/cm^2 de resiliencia; con un revenido de 500°C , queda con 110 kg por milímetro cuadrado de resistencia, 12% de alargamiento y $7,5\text{ Kgm/cm}^2$ de resiliencia, y si la temperatura de revenido se eleva a 600°C quedara con $R = 85\text{ Kg/mm}^2$.

La pérdida de dureza que experimentan con el revenido los aceros al carbono de herramientas de 0,70% a 1,30% de Carbono templados.

En ciertos aceros especiales de alta aleación en los que después del temple queda además de martensita algo de austenita residual sin transformar, se presenta un curioso fenómeno de aumento de dureza cuando el revenido se hace en la zona de temperaturas comprendidas entre 330° y 550° .



Las variaciones de características que experimentan los aceros por efecto del revenido son debidas a cambios de microestructura que consisten principalmente, en la descomposición más o menos completa de la martensita que se había obtenido en el temple ya que se transforma en otros constituyentes más estables.

Recientemente con ayuda del microscopio electrónico y de los rayos X, se han podido estudiar con más detalle todos los fenómenos. Se han dado nuevas interpretaciones y se ha llegado actualmente a la conclusión de que el revenido se produce en tres etapas principales.

La primera etapa se realiza a bajas temperaturas, inferiores a 300° C, y en ella se precipita un carburo de hierro (épsilon) y el contenido en carbono de la martensita baja a $C=0,25\%$. El carburo épsilon cristaliza en el sistema hexagonal; su fórmula es Fe_2C_4 y es un carburo diferente de la cementita Fe_3C . Esa precipitación del carburo épsilon se realiza en los límites de los subgranos heredados de la austenita, los cuales se siguen manifestando en la martensita. En esa fase la formación de carburo épsilon origina, como ya se ha indicado, una pérdida importante de carbono en la martensita, que al final de esta fase queda aproximadamente con 0,25% de carbono y su red tetragonal se transforma en red cúbica.

La segunda etapa sólo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero templado, y en esa etapa la austenita retenida se transforma en bainita. La zona de temperatura en que se produce esta segunda etapa solapa a las temperaturas en que se producen las etapas primera y tercera. Esa bainita, al ser luego calentada en el revenido a altas temperaturas, sufre también una precipitación de carburos de hierro con formación final de cementita y ferrita.

En la tercera etapa el carbono (épsilon), que apareció en la primera etapa, se transforma en cementita Fe_3C . Al aumentar progresivamente la temperatura del acero se forma primero un precipitado de cementita en los límites de las



agujas de martensita y también en su interior. Luego, al aumentar la temperatura de redisuelve la cementita del interior de las agujas, mientras se engruesa, en cambio, la cementita que envuelve a la martensita. Luego, al continuar elevándose todavía más la temperatura, se va rompiendo la envolvente de cementita, que se va presentando cada vez más discontinua en las zonas límites de las antiguas agujas de martensita. Al progresar el calentamiento, la coalescencia y globulización de la cementita prosigue, y a 600° C, con grandes aumentos, es ya clara y definida y la matriz queda constituida por ferrita. Al final la martensita se ha transformado en cementita y ferrita.

2.3. Ensayos

2.3.1. Ensayos de dureza

A pesar de que parece fácil comprender lo que se entiende por dureza y ser ésta una de las magnitudes que con más frecuencia se miden, es también una de las propiedades de la materia sobre la que existe mayor confusión, habiendo a veces cierta dificultad para definirla con claridad y exactitud.

No se puede medir la dureza utilizando una unidad absoluta; las cifras que se manejan son siempre empíricas y se refieren únicamente a un medio particular de medida. En la actualidad existen muchos métodos para medir la dureza, que pueden clasificarse, según el procedimiento que se emplea, en tres grupos:

1. Los que miden la resistencia mineralógica, o la dureza que oponen los cuerpos a ser rayados.
2. Los que miden la resistencia que oponen los cuerpos a la penetración. Esta clase de dureza es la que más frecuentemente se mide, y puede ser determinada estática o dinámicamente, es decir, se puede ejercer la presión progresivamente o por medio de un golpe.
3. Los que miden la dureza elástica o al rebote.

Actualmente los métodos más usados son los siguientes: Brinell, Rockwell, Vickers y Shore.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alear

A pesar de que los fundamentales en que se basan los diferentes procedimientos de ensayo son distintos entre sí, hay tablas de equivalencias en las que se pide comparar las cifras de durezas halladas en cada caso.

La medida de la dureza interesa unas veces para tener idea aproximadamente de la resistencia del material, otras para conocer si resistencia a la penetración o al desgaste. También suele interesar conocer también puede servir de guía, pero hay que obrar con precaución, pues a veces no hay correspondencia entre la dureza y la aptitud para ser trabajado el material.

El ensayo Vickers que es el que hemos empleado durante el estudio está basado en el parecido a Brinell, se basa en la resistencia que oponen los cuerpos a ser penetrados y también se halla la dureza, dividiendo la carga por la superficie de huella.

Se diferencia de aquel por ejemplo, en el cuerpo penetrador, un diamante tallado en forma de pirámide cuadrangular de 136° entre caras.

El ángulo de 136° fue elegido para que las cifras Vickers coincidan con las Brinell. Esto ocurre hasta 250 unidades, pero a partir de esta cifra la dureza Vickers es siempre algo superior a la Brinell. La diferencia al principio es pequeña, pero es bastante grande para durezas elevadas. Esto es debido a la deformación de la bola, que falsea los resultados teóricos, lo que no sucedería si la bola pudiera fabricarse de un material que no sufriera deformación.

Al utilizar un diamante como cuerpo penetrador, tenemos además un cuerpo de dureza más definida y constante que una bola de acero que la tiene muy incierta, y aun admitiendo que la dureza del diamante no sea absolutamente constante en la práctica, como es superior a la de todos los metales que deben ensayarse, las diferencias que existen no producirán ningún efecto alguno del ensayo.



Este método es sobre todo interesante, cuando la dureza del metal a ensayar es superior a 500 Brinell, pues a partir de esta cifra la deformación de la bola es ya de bastante importancia.

Otra diferencia notable con el sistema Brinell, es que usando como cuerpo penetrador la pirámide de diamante, los resultados que se obtienen son siempre comparables, aunque se emplean cargas diferentes, porque las huellas son siempre geométricamente semejantes entre sí, lo que no ocurre con la bola. Normalmente se emplean cargas variables de 1 a 120 kgs siendo la carga normal de 30 kgs.

El principio Vickers ha sido aplicado al microscopio, habiéndose podido determinar la dureza de los constituyentes de estructura utilizando cargas muy pequeñas desde 1 a 100gr se llama microdureza.

Puede utilizarse por tanto para toda clase de materiales, blandos y duros, y también para chapas muy delgadas, piezas cementadas, nitruradas, endurecidas superficialmente, etc. Por todas estas razones es el procedimiento que se emplea para determinar las durezas en todos los estudios e investigaciones científicas.

La forma de operar es muy sencilla. La carga es aplicada por medio de un juego de palancas que mueven una leva. Después de haber mantenido la carga durante un cierto tiempo, relativamente corto, se coloca automáticamente un microscopio sobre la huella a la vez que se levanta la punta del diamante. La huella formada es muy pequeña y sus bordes forman en la superficie ensayada en cuadrado cuyas diagonales se miden en una retícula graduada y luego en una tabla se halla la dureza.

2.3.2. Ensayos de metalografía

La metalografía, tiene por objeto el estudio de la estructura de los metales, siendo esta estructura una de las siguientes:



Ferrita

La ferrita es hierro alfa, o sea hierro casi puro que puede contener en pequeñas soluciones cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados, suelen formar solución sólida con la ferrita, el níquel, manganeso, cobre, silicio, aluminio, etc.

Cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado, estando el cubo elemental formado por ocho átomos, situados en los vértices y uno en el centro. Es el más blando de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable. Magnética y de pequeña fuerza coercitiva.

Los reactivos habituales, ácido nítrico, ácido pícrico y reactivo de Benedicks no la colorean, destacando únicamente en los aceros de muy bajo porcentaje de carbono, la unión de los granos, en forma de líneas negras, de contornos suaves e irregulares. Un ataque prolongado sombrea ligeramente a los cristales y pone en evidencia su diferente orientación. A menudo las impurezas dan lugar también a una desigual coloración de los cristales.

Cementita

La cementita es carburo de hierro, Fe_3C contiene 6,67% de carbono y 93,33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a 68 Rockwell-C y cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño.

No es coloreada por los reactivos usados corrientemente apareciendo de un color blanco brillante siempre que se ataca el acero con reactivos ácidos. Sólo la colorean el picrato sódico en caliente y los ataques oxidantes al aire. Por su gran dureza queda en relieve después del pulido, pudiendo conocerse perfectamente el contorno de los granos o de las láminas por el sombreado que aparece con iluminación oblicua.

Ambas ferrita y cementita, quedan blancas después del ataque con ácidos, se pueden diferenciar una de otra atacando el acero con picrato sódico en



caliente, que colorea de oscuro a la cementita, dejando blanca a la ferrita. La perlita es coloreada ligeramente también.

Perlita

La perlita es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de hierro alfa y carburo de hierro CFe_3 , o lo que es lo mismo, de ferrita y cementita. Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de los 650° a 725° .

La ferrita y cementita que componen la perlita y aparecen formando láminas paralelas y alternadas que tienen reflejos nacarados, por lo que se le dio el nombre de constituyente perlítico. Según la velocidad de enfriamiento, esas laminillas aparecen más o menos separadas, y cuando el enfriamiento a sido bastante rápido, las laminas se acercan mucho, de forma que en el microscopio, aun con grandes aumentos, no se puede distinguir.

La perlita que se colorea de oscuro con todos los reactivos ácidos, nital, pical, etc., se oscurece más rápidamente que la martensita, pero queda más clara que la troostita y la sorbita.

Es interesante recordar que la coloración de la perlita no es más que un efecto de las sombras y de los relieves de los elementos que la forman, pues ni la ferrita ni la cementita son coloreadas por los ataques que ensombrecen la perlita; estos reactivos destacan el relieve de la cementita y esa es la causa del aparente colorido de la perlita.



Austenita

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1,7% de Carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita, cuando se calientan a temperatura superior a la crítica. Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono o de muy alta aleación.

Templando perfiles muy delgados de aceros de elevado contenido en carbono, desde alta temperatura en agua muy fría, aparecen grandes cristales blancos de austenita mezclados con agujas en zigzag de martensita.

En los aceros austeníticos de alta aleación se presenta formando cristales poliédricos parecidos a la ferrita, pero se diferencia de estos por ser sus contornos más rectilíneas y los ángulos vivos.

La austenita es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz. Tiene una gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros.

A la temperatura ordinaria, es muy raro encontrarla en la microestructura de las piezas o herramientas fabricadas con aceros de baja aleación. Aparece, en cambio, más frecuentemente, aunque en cantidades más pequeñas y casi siempre mezclada con martensita en los aceros muy aleados, enfriados rápidamente desde alta temperatura, siendo como es natural, el constituyente fundamental de los aceros cromo-níquel austeníticos y de los aceros de 12% de manganeso.

La disposición atómica de la red elemental de la austenita es el cubo de hierro gamma de caras centradas. Esos átomos de carbono ocupan las posiciones que se ha indicado de una forma desordenada y al azar. Debido a la pequeña proporción de carbono que contienen los aceros hay muchos menos



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

átomos de carbono que de hierro y, por lo tanto, en la mayoría de los casos, los centros de las aristas se encuentran vacíos.

Martensita

La martensita es el constituyente típico de los aceros templados. Se admite que está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde alta temperatura.

Sus propiedades físicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono, hasta un máximo de 0,90% aproximadamente. Después de los carburos y de la cementita es el constituyente más duro de los aceros. Presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas en zigzag, con ángulos de 60°.

Cuando aparecen las agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita, la observación con grandes aumentos es bastante clara. Esta estructura se suele obtener en los aceros de alto contenido en carbono y alta aleación, templados desde elevada temperatura, en los que no se ha conseguido la completa transformación de la austenita en martensita, quedando en algunas ocasiones hasta 30% de austenita sin transformar. En cambio, cuando la transformación es completa, al no existir el fondo blanco de austenita, la observación es más difícil. Cuando el temple se hace a la temperatura correcta, en general se obtienen estructuras de martensita más fina.

La martensita cristaliza en el sistema tetragonal, estando formada su red elemental por un paralelepípedo que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado del hierro alfa. Parece que en la martensita son los átomos de carbono los causantes de la deformación de la red cúbica de hierro alfa, que se transforma en tetragonal, teniendo el paralelepípedo elemental dos lados iguales, y el tercero, que es un poco mayor guarda con los otros dos una relación en el contenido en carbono.



Troostita

Es un agregado extremadamente fino de cementita y hierro alfa. Se produce por enfriamiento de la austenita a velocidad ligeramente inferior a la crítica de temple. Aparece en los aceros enfriados desde el estado austenítico a velocidades ligeramente inferiores a las de temple y en el corazón de grandes piezas templadas en agua, y otras templadas en aceite.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita. Es magnética. Es un constituyente nodular oscuro, con estructura radial, y aparece generalmente acompañando a la martensita y a la austenita, situándose en los contornos de los cristales.

La troostita se oscurece con más intensidad que ningún otro constituyente al ser atacada por cualquiera de las soluciones alcohólicas de ácido nítrico o pícrico.

Sorbita

Es un agregado extremadamente fino de cementita y hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento de la austenita a velocidad bastante inferior a la crítica del temple. Es el constituyente de máxima resiliencia de los aceros.

Con pocos aumentos aparece mal definida en forma de manchas difusas, pero con grandes ampliaciones se ve en forma de pequeños gusanillos y a veces como granos blancos muy finos sobre un fondo oscuro.

Es el constituyente de casi todos los aceros forjados y laminados pues la velocidad de enfriamiento en estos procesos no suele ser suficientemente lenta para la formación de la perlita.



Bainita

Desde el principio se diferenciaron dos tipos de estructuras. La bainita superior de aspecto absorbente formada a unos 500° y que difiere bastante de la bainita inferior, formada a más baja temperatura 250° - 400° que tiene aspecto bastante parecido a la martensita. La bainita superior está formada por una matriz de ferrita conteniendo carburos. Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.

La bainita inferior está constituida por agujas alargadas de ferrita que contiene delgadas placas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre sí y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de los agujas de ferrita.



3. Parte experimental

Vamos a realizar un estudio comparativo entre dos aceros, uno de ellos sin alear F-1140 y el otro aleado F-1252. Contaremos con 8 piezas iguales para cada material, a las cuales les aplicaremos diferentes tratamientos térmicos que modificaran su microestructura; permitiéndonos así cambiar las propiedades del acero y compararlas entre sí.

En general hay cuatro tipos básicos de tratamiento térmico:

- Recocido
- Normalizado
- Temple
- Revenido

Todos los tratamientos térmicos tienen una ruta obligatoria:

- Calentamiento del acero hasta una temperatura determinada
- Permanencia a esa temperatura cierto tiempo
- Enfriamiento más o menos rápido

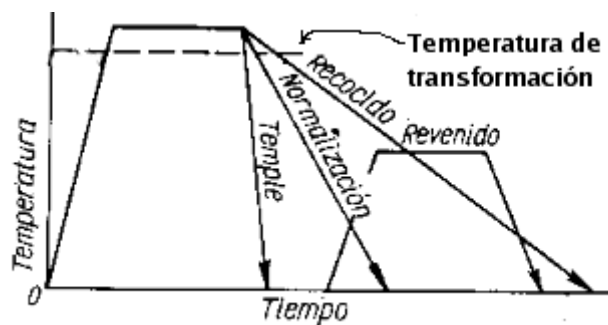


Figura 1

En esta imagen se muestra un gráfico esquemático de los diferentes tratamientos térmicos que vamos a llevar a cabo y como se desarrolla el proceso para cada uno de ellos. El carácter de la transformación del acero depende de la velocidad de enfriamiento.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alear

Durante un enfriamiento lento en el horno se verifica el recocido; si el enfriamiento se realiza al aire libre, tal recocido se denomina normalizado. El temple se hace utilizando un enfriamiento rápido en agua.

En primer lugar sometemos a estudio una pieza de cada material sin haber sido aplicado ningún tratamiento térmico.

Comenzaremos desbastando la pieza dado que la superficie tiene una cierta ondulación después del corte y con este paso se desea lograr una superficie totalmente plana para darle luego el acabado final en el pulido. En este caso hemos utilizado una serie de 4 lijas comenzando por la del grano más grueso (360) y terminando por la del grano más fino, (1200) pasando por la de 600 y 800. Cada cambio de lija que hagamos conviene girar 90° la pieza, para así darle un mejor acabado. A continuación procedemos a pulir las piezas para así eliminar las rayas que permanecen al final del desbaste. Se trata de dejar la superficie como un espejo para una mejor posterior observación al microscopio. Para realizar el pulido se coloca un paño húmedo al cual se le añade un abrasivo fino como es en nuestro caso alúmina en suspensión.

En el ensayo de dureza Vickers estudiaremos variaciones de dureza en zonas muy pequeñas y con cargas también muy pequeñas, por eso lo llamaremos MICRODUREZA. Las huellas que dejan son muy pequeñas, del orden de micras, por lo que el equipo utilizado debe ser distinto, se llama microdurómetro y actúa por un lado como durómetro para la aplicación de la carga y realización de la huella y, por otro lado, como microscopio metalográfico para poder ver la huella y calcular la longitud de las diagonales. La media aritmética entre las medidas obtenidas en el ensayo son:

- Para el acero F-1140 → 263,34 HV
- Para el acero F-1252 → 347,28 HV

Una vez estudiada la dureza de las primeras piezas, procedemos a atacarlas con nital durante unos segundos, para poder distinguir al microscopio la



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

perlita de la ferrita. La ferrita permanece inalterada ante el ataque permaneciendo de color blanco; sin embargo la perlita se vuelve más negra, y es la diferencia en la tonalidad lo que nos permite distinguirlas al observarlas en el microscopio



En la figura 2 del acero F- 1140 a 200 aumentos nos hacemos una idea de la proporción que guarda la perlita y la ferrita siendo esta del 50 %.

Figura 2

En la figura 3 perteneciente al acero F-1140 a 1000 aumentos se puede observar levemente la estructura laminar del acero



Figura 3

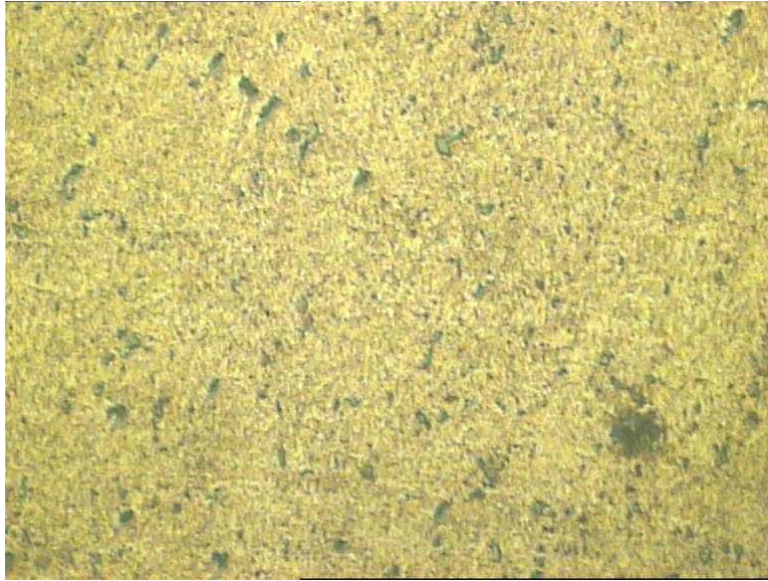


Figura 4

En la figura 4 perteneciente al acero F-1252 a 500 aumentos observamos un poco de grano aunque muy pequeño. La proporción de ferrita es mucho mayor que la de perlita.

A la vista de las imágenes anteriores podemos comentar las diferencias respecto del tamaño de grano. Para el acero F- 1140 el tamaño de grano es mucho mayor que en el acero F- 1252, por lo tanto el acero aleado es mucho más duro y resistente. El grano comienza a verse debido a su tamaño mucho antes en el acero F- 1140. En la figura1 se puede observar claramente el grano sin embargo tenemos que esperar hasta 500 aumentos para ver el grano en el acero F- 1252.

La proporción que guardan perlita y ferrita es prácticamente la misma, en el caso del acero F- 1140 pero claramente distinta en el F- 1252, siendo inferior la presencia de perlita frente a la ferrita.

Ahora se procede a realizar un corte longitudinal sobre otra pieza y volvemos a repetir el proceso anterior: desbastado, pulido, para luego atacar con nital y así distinguir sus componentes al microscopio.

En estas imágenes del acero F- 1140 a 200 y 500 aumentos respectivamente podemos observar el grano orientado en el sentido longitudinal, lo que indica que ha habido una deformación en frío. Como partíamos de una barra cilíndrica se puede deducir que el proceso de fabricación fue la laminación.



Figura 5

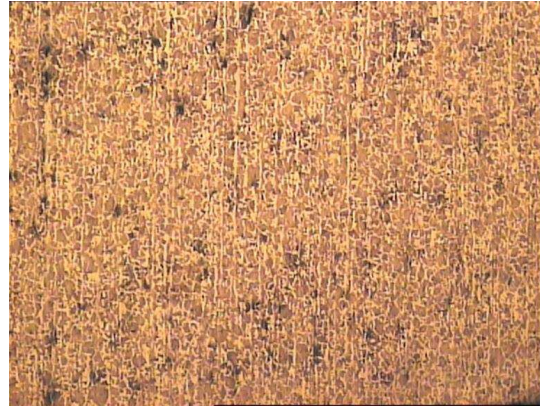


Figura 6

Para el acero F- 1252 a 100 y 500 aumentos respectivamente podemos observar las impurezas orientadas en el sentido longitudinal de la pieza, lo que nos indica que el grano también está orientado de la misma forma para 100 aumentos. Para 500 aumentos como el grano es tan pequeño no se aprecia mucho.

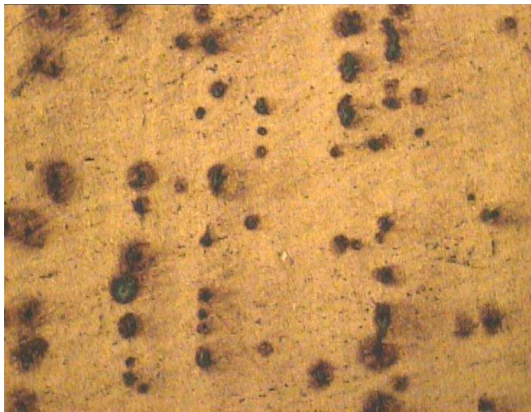


Figura 7



Figura 8

Una vez estudiados los aceros aleados y sin alear debemos empezar a someterlos a ensayos para ver como se modifican sus propiedades. El primero de esos ensayos es darle un recocido de recristalización a 600° C. Procederemos a precalentar el horno a 600°C y cuando vemos que este estabilizado introducimos una pieza de cada material durante una hora y lo dejamos enfriar en el horno durante un día.



Cuando tenemos las piezas frías, procedemos a desbastar y pulir. Una vez tenemos limpiadas las piezas medimos la microdureza y obtenemos los siguientes resultados:

- Para el acero F-1140 → 205,36 HV
- Para el acero F-1252 → 299,7 HV

Los aceros que anteriormente han sido laminados en frío se endurecen y pierden tenacidad, por lo tanto debemos someterlos a un tratamiento de recocido contra acritud para reducir la dureza la pieza, siendo esta la consecuencia más directa de este tipo de tratamiento. La resistencia a la tracción y el limite elástico, tambien se ven reducidos por este tratamiento.

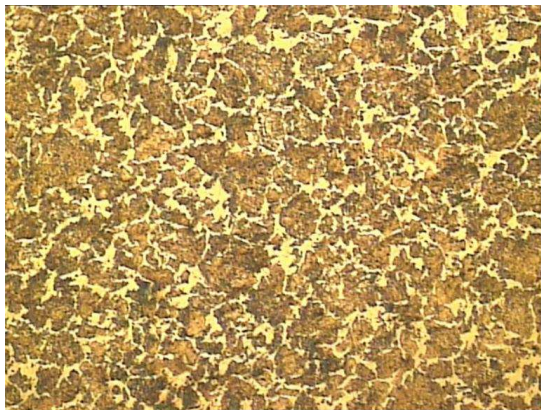


Figura 9



Figura 10

La figura 9 y la figura 10 corresponden al acero sin alear F-1140 a 200 aumentos y 1000 aumentos respectivamente. En ambas fotografías podemos observar perfectamente el grano.

En este tipo de recocido también llamado de recrystalización se consigue un acero excesivamente frágil, rompiéndose con facilidad, cuando se produce la recrystalización de la ferrita.



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin aliar

Si comparamos las fotografías con las obtenidas en la pieza sin tratamiento, podemos comprobar, que el grano es en general más homogéneo.

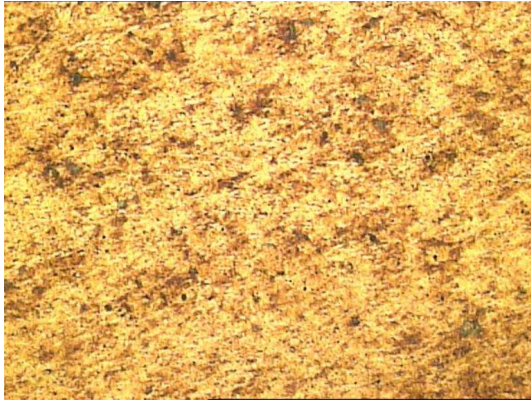


Figura 11

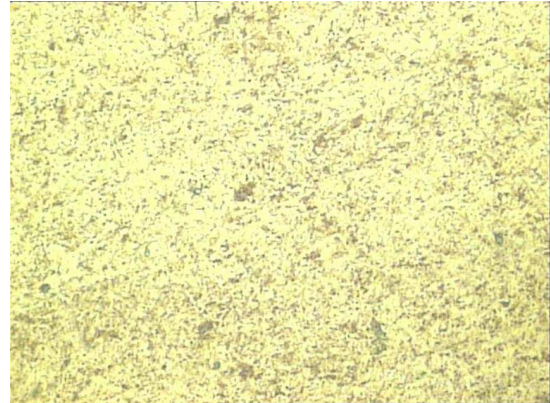


Figura 12

Las figuras 11 y 12 corresponden respectivamente a 200 y 1000 aumentos para el acero 1252. A 200 aumentos no podemos decir nada de la microestructura ya que es inapreciable, por el contrario a 1000 aumentos podemos observar la microestructura pero se aprecia muy poco debido al pequeño tamaño de grano.



Volvemos a introducir en el horno 6 piezas de cada material a 860° durante una hora. Pasado ese tiempo, una de las piezas la dejaremos enfriar en el horno (Recocido de regeneración), otra de ellas la dejamos enfriar al aire (Normalizado) y las otras 4 las enfriamos de una manera rápida en agua más agitación (Temple).

Comenzaremos el estudio hablando del recocido de regeneración a 860° , del que debemos destacar un tamaño de grano más fino, respecto del anterior recocido.

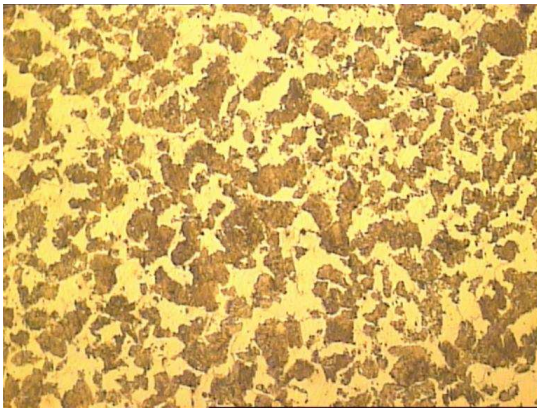


Figura 13

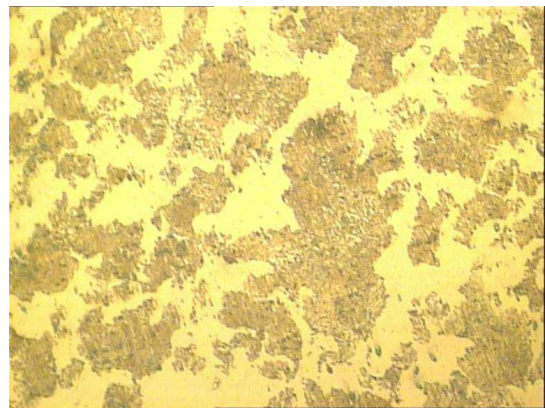


Figura 14

En estas cuatro imágenes, dos en la parte superior pertenecientes a un acero sin alear F-1140 y dos en la parte inferior relativas a el acero aleado F-1252; así mismo las fotografías situadas a la izquierda pertenecen a 200 aumentos a diferencia de las ubicadas a la derecha que pertenecen a 1000 aumentos.

La microestructura de ambos aceros es perlítico-ferrítica, por lo que la principal diferencia la podemos encontrar en el tamaño de grano. Para el acero F-1252 el tamaño de grano es mucho más pequeño, lo que lo hace ser un material mucho más resistente.

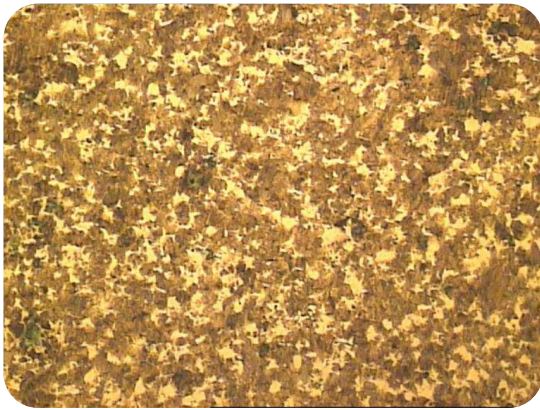


Figura 15

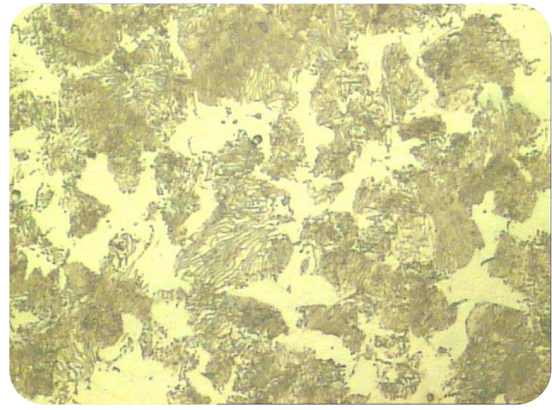


Figura 16

En esta ampliación vemos claramente como en el acero F-1252 existe una estructura laminar de la ferrita.

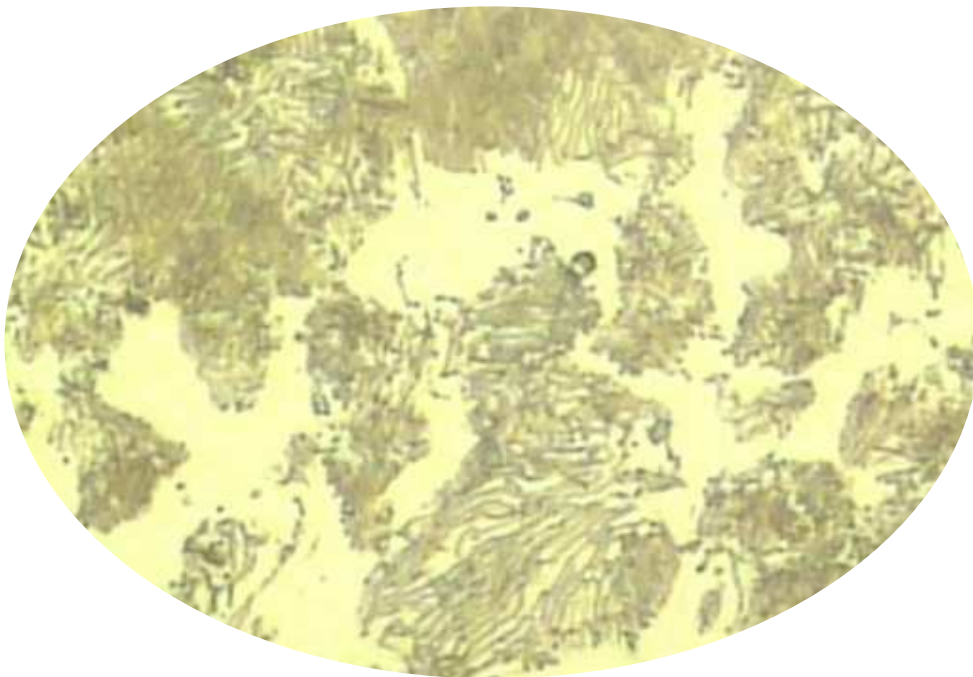
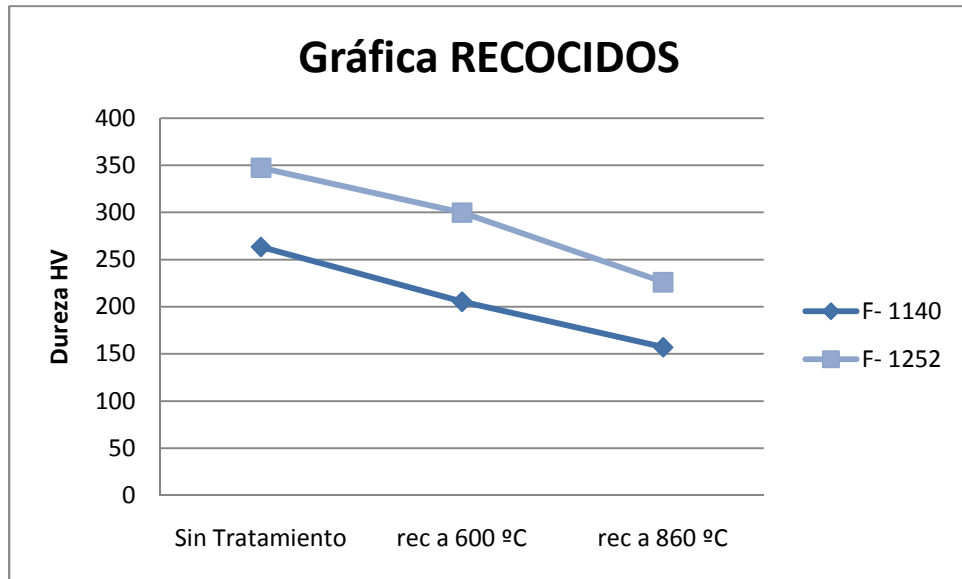


Figura 17



En la gráfica anterior debemos destacar que la mayor dureza en ambos aceros se encuentra en la pieza sin ningún tipo de tratamiento, luego y a medida que aumentamos la temperatura del recocido disminuye aun más la dureza.

La microestructura es constante a lo largo de los recocidos siendo perlítico-ferrítica. Para el recocido de recristalización a 600° C en el acero F-1252 apenas podemos observar nada, debido a un tamaño pequeño de grano, por el contrario en el recocido de regeneración sí que podemos apreciar la microestructura de ambos aceros, aunque en el acero aleado el tamaño de grano sigue siendo pequeño respecto al sin alear, lo que le hace ser un material mucho más resistente.

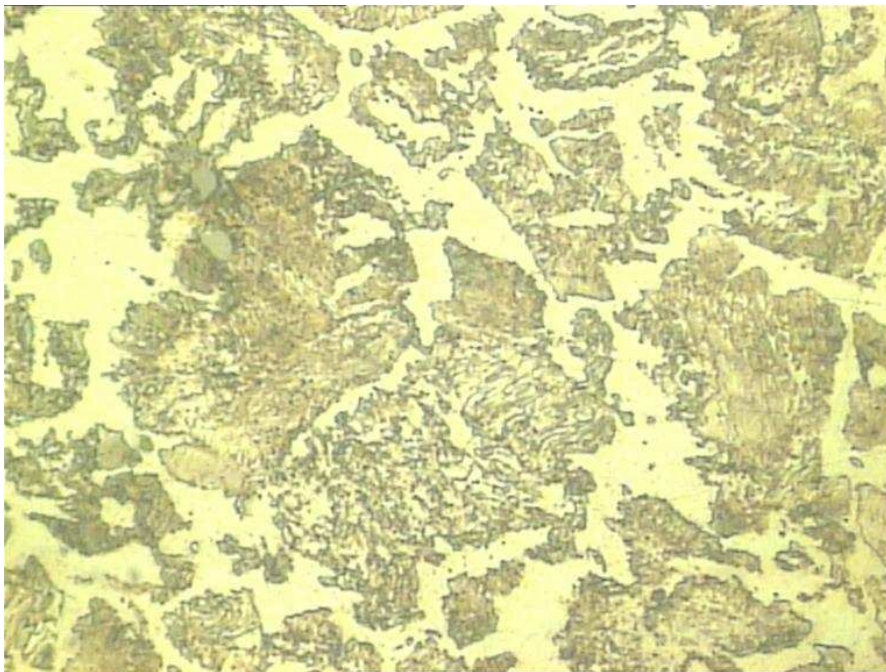


Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

El siguiente ensayo que vamos a analizar es el normalizado que resulta bastante similar al recocido de regeneración.

Consiste en calentar el acero a temperaturas por encima de A_3 y una vez que todo el material haya pasado al estado austenítico, se realiza un enfriamiento al aire. La estructura final que se obtiene con el tratamiento es la perlita más fina que la obtenida en el recocido, también llamada bainita, por lo tanto presenta una dureza algo más elevada, como a continuación mostramos:

- Para el acero F-1140 \rightarrow 208,4HV
- Para el acero F-1252 \rightarrow 453HV



En el
acero F- 1140
a 1000
aumentos se
puede observar
la estructura
laminar que
forma la
perlita.

Figura 18

Para el acero aleado F- 1252 19a 1000 aumentos el cual observamos en la figura la microestructura que podemos observar la microestructura de bainita.



Figura 19

Como podemos comprobar con los resultados obtenidos en el normalizado de ambos aceros, nos damos cuenta, que los aceros al carbono como el F- 1140 han estado sometidos anteriormente a trabajos en frío como puede ser la laminación, para regenerar su estructura cristalina y eliminar las tensiones internas. Para los aceros aleados no es tan eficiente el tratamiento, aunque también consigue un gran aumento de dureza. Proporciona un buen equilibrio entre resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad.



El revenido se da a los aceros sometidos anteriormente a un tratamiento de temple. Tiene dos funciones principales:

- Eliminar tensiones
- Aumentar la tenacidad

Como el resto de los tratamientos térmicos va a pasar por tres fases:

1. Calentamiento. La temperatura variara dependiendo del revenido, en nuestro caso será de 200°C, 400°C y 600°C.
2. Mantenimiento. El tiempo de mantenimiento es de una hora.
3. Enfriamiento. En nuestro caso al aire.

La primera de las piezas lleva un temple sin revenido en el que podremos ver la estructura inicial. Para el caso del acero sin alear F-1140, podemos ver claramente las agujas de martensita en un tamaño superior respecto a las agujas, que se formaran en el acero aleado F-1252, que a su vez también contara con austenita retenida. La martensita al ser metaestable, tiende a descomponerse, en ferrita distorsionada y cementita. Las agujas de martensita las podemos ver perfectamente en las siguientes figuras:

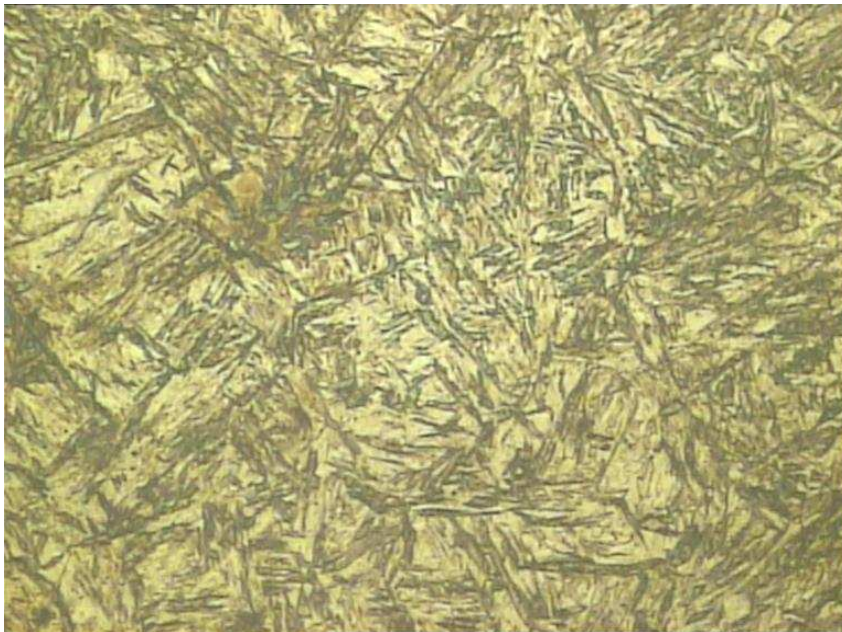


Figura 20

En la figura 20 perteneciente a un acero sin alear F-1140 x 1000 aumentos, observamos agujas de martensita.



En la figura 21 perteneciente al acero aleado F-1252 x 1000 aumentos podemos ver agujas de martensita mucho más pequeñas que en el acero sin alear F-1140. También podemos darnos cuenta que hay austenita retenida.



Figura 21

Deberemos prestar especial atención a las transformaciones que experimenta la martensita, en el intervalo de una hora en función de la temperatura son las siguientes:

- Temperatura de 200°C: En esta fase se produce la precipitación en los bordes de grano de un carburo de hierro de tipo hexagonal, carburo épsilon, acompañado por una pérdida de carbono en la red tetragonal de la martensita que se transforma en cúbica distorsionada. Esta transformación va unida generalmente a una disminución de la dureza.
 - Para el acero F-1140 → 502,42 HV
 - Para el acero F-1252 → 592,5 HV



La estructura que se obtiene se conoce como martensita revenida.

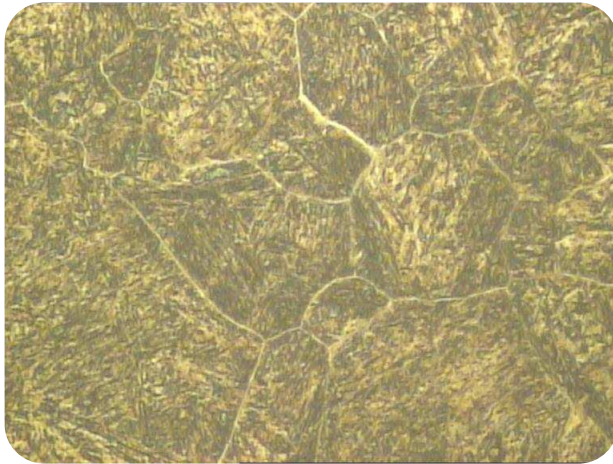


Figura 22

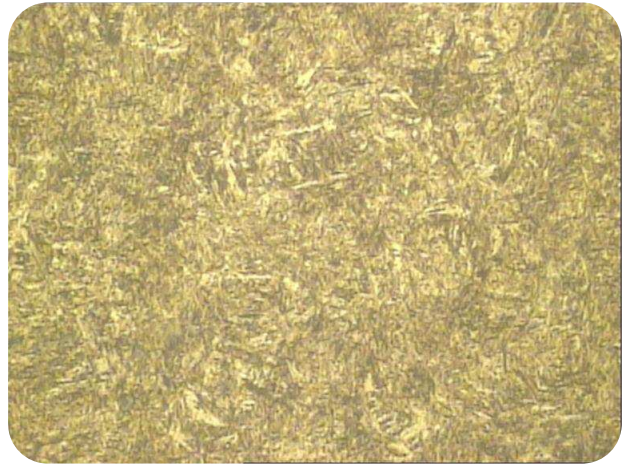


Figura 23

Ambas fotografías corresponden a 1000 aumentos dado que a una resolución menor apenas se observa nada. La imagen de la izquierda pertenece a un acero sin alear F-1140 en el que claramente podemos ver el borde de grano que forman los carburos, en cambio en la imagen de la derecha no podemos ver tan claro el borde de grano que forman los carburos aunque sí que se observa ciertas zonas blancas que indican la presencia de los mismos.

- Temperatura de 400°C: continúa el crecimiento de los carburos en los bordes de las agujas, hasta que son visibles con el microscopio metalográfico como a continuación les mostraré. Estamos justo al borde de sufrir el fenómeno conocido como fragilidad que se mantiene desde unos 230°C hasta unos 400°C. La antigua martensita ha perdido todo el carbono, convirtiéndose en ferrita. La estructura obtenida se conoce como bainita. La dureza vuelve a ser menor registrándose valores del orden de:
 - Para el acero F-1140 → 377,26 HV
 - Para el acero F-1252 → 467.76 HV

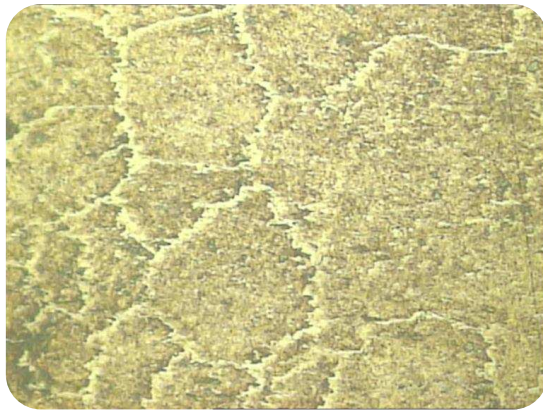


Figura 24

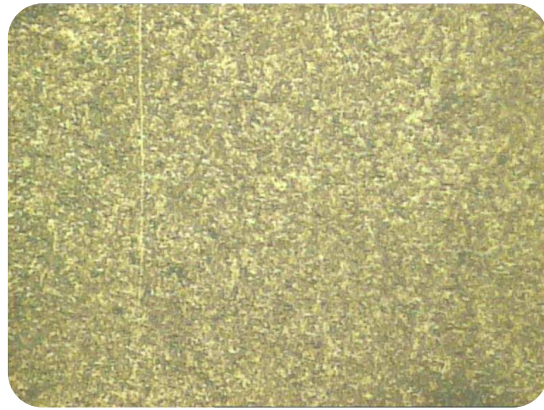


Figura 25

En la fotografía de la izquierda F-1140 x 1000 podemos ver que la antigua martensita, queda sustituida por perlita y ferrita. Además podemos observar unos resaltes de carburos que son una clara marca de la dureza de la pieza. A la derecha el acero aleado F-1252 x 1000 aumentos no nos deja ver con tanta claridad los resaltes de carburos en los bordes de grano, lo que nos da una idea de la proximidad y el tamaño de sus granos más bien pequeños y que le hacen dotar de una gran resistencia a su acero.

- Temperatura de 600°C: En esta fase las partículas de cementita comienzan a crecer al aumentar la temperatura, haciéndose visibles al microscopio metalográfico. La estructura, ya estable, está formada por cementita en una matriz de ferrita.
 - Para el acero F-1140 → 249,46 HV
 - Para el acero F-1252 → 351,76 HV



Análisis de las propiedades y diferencias entre un acero aleado y sin alea

En la figura 26 perteneciente al acero aleado F- 1252 a 1000 aumentos, podemos observar ligeramente la profundidad de la cementita.



Figura 26

En estas fotografías podemos observar perlita y ferrita más fina para ambos aceros, el de la izquierda pertenece a un acero al carbono F- 1140 a 1000 aumentos y el de la derecha con un grano más pequeño pertenece a un acero F- 1252.



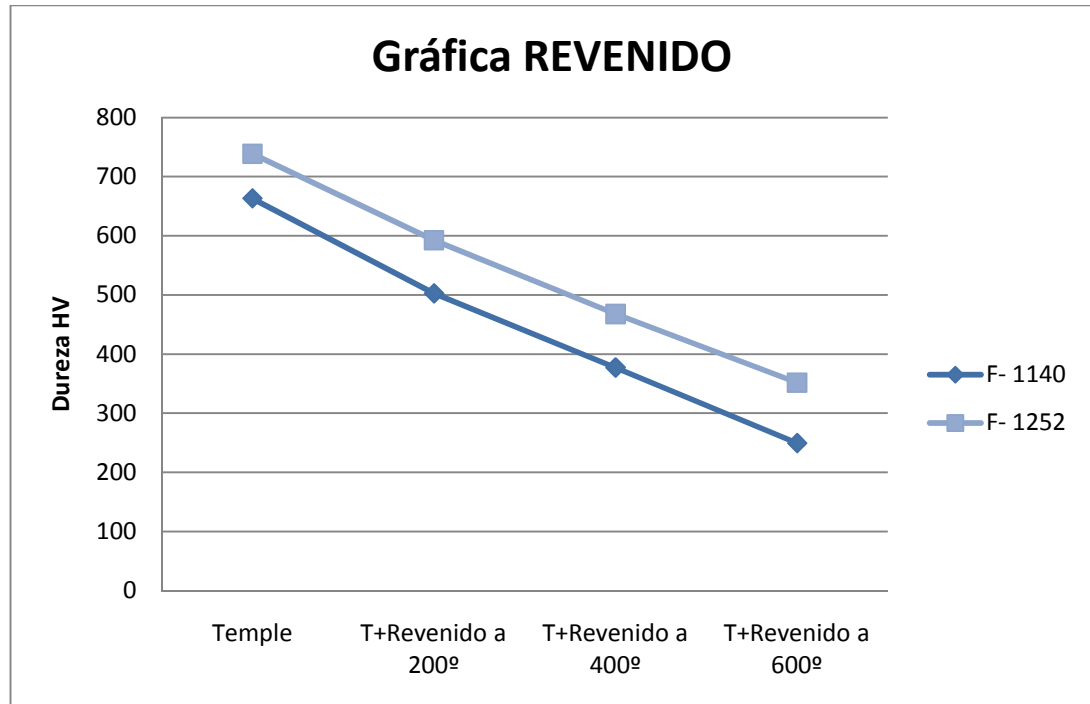
Figura 27



Figura 28

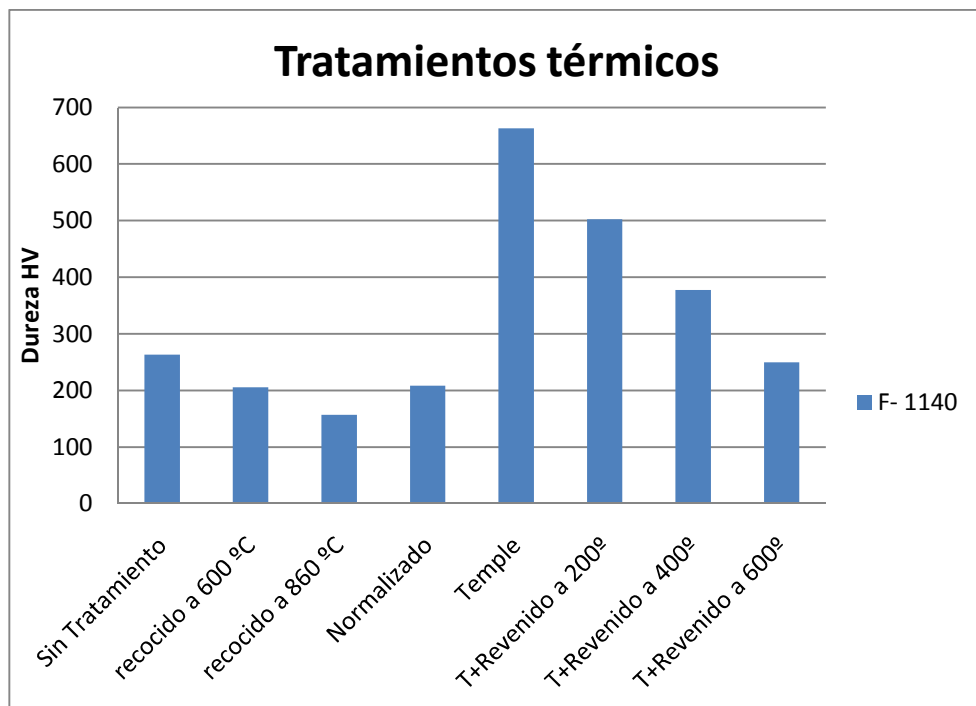


A continuación le mostramos una gráfica resumen del tratamiento térmico del revenido para ambos aceros.



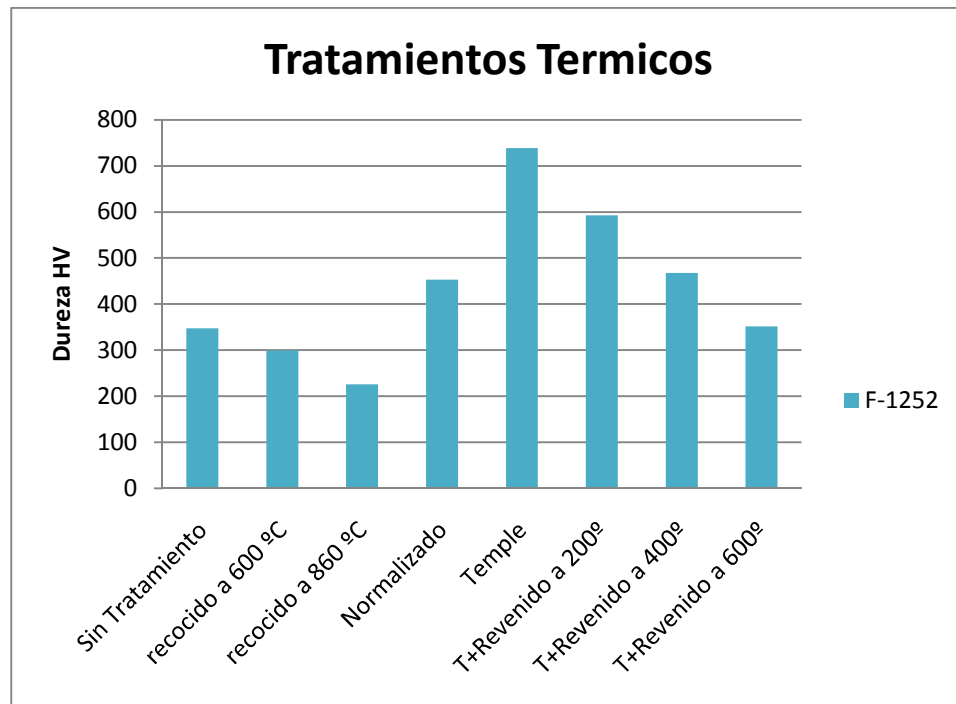
Con esta gráfica podemos concluir que la mayor dureza la podemos obtener en el temple. Al someter la pieza al revenido podemos afirmar que conforme se aumenta la temperatura disminuye la dureza, hasta valores aproximados a la pieza sin ningún tipo de tratamiento.

La microestructura comienza siendo martensítica y paulatinamente va perdiendo las agujas de martensita y los carburos para terminar siendo perlítico-ferrítica. Cuando comienza el revenido la martensita pasa a llamarse martensita revenida. Las agujas de martensita son más grandes en el acero al carbono.



En estas dos tablas una perteneciente al acero sin alea situada en la parte superior, y otra para el acero aleado situada en la hoja posterior, podemos observar una representación gráfica para cada uno de los tratamientos térmicos empleados. La mayor dureza pertenece al tratamiento del temple y la menor al recocido de regeneración.

Conforme aumenta la temperatura en el recocido disminuye la dureza al igual que ocurre en el revenido.





4. Conclusiones

A lo largo del estudio que hemos realizado a los aceros F-1140 y F-1252, podemos concluir las siguientes afirmaciones:

La dureza mayor para ambos aceros se da para el tratamiento térmico del temple a 860°.

A partir de este tratamiento podemos hablar del tratamiento térmico del revenido, en el que conforme aumentamos la temperatura hasta 600°, disminuye la dureza del material.

La dureza que queda al finalizar el tratamientos térmico del temple + el revenido a 600° es aproximadamente la misma que la dureza que hay en la pieza sin ningún tipo de tratamiento.

En el recocido ocurre lo mismo que en el revenido, conforme aumenta la temperatura disminuye la dureza.

Respecto a la microestructura, en el recocido y el normalizado es aproximadamente la misma aunque cambien las proporciones pero siempre tratándose de perlita y ferrita. Al comparar ambos aceros debemos comentar que en acero aleado F-1252, el tamaño de grano es mucho más pequeño lo que nos hace darnos cuenta de la elevada resistencia respecto del acero al carbono F-1140.

Para el tratamiento del temple aparece la martensita en forma de agujas, claramente diferenciables en ambos aceros, siendo más pequeñas y abundantes en el acero aleado. Al aumentar la temperatura en el revenido cada vez podemos observar cómo se reducen los carburos y la dureza, hasta quedar una estructura perlítico-ferrítica.



5. Bibliografía y documentación

- *“Introduccion a la metalurgia fisica”*

Autor: Sydney Avner.

Ed. Madrid del yg Castillo Ano: 1983

- *“Ingenieria de materiales para industria y construccion”*

Autor: J.M. Sanjose, Ma. Antonieta Madre Sediles, J. M. Franco

Gimeno

Ed. Mira Editores.

- *“Ciencia de los materiales para la ingenieria”*

Autores: Peter A. Thornton y Vito J. Colangelo.

Traduccion: Fernando Fournier Montiel.

Ed. Prentice-Hall. Hispanoamericana, S.A. Ano: 1987

- *“Tratamientos térmicos de los aceros”*

Autor: José Apraiz Barreiro

Editoriales Dossat 2000 S.L (decima edición)



Páginas webs consultadas

- <http://juliocorrea.wordpress.com/2007/08/23/tratamientos-termicos-del-acero/>
- <http://www.sabelotodo.org/metalurgia/tratatermacero.html>
- <http://kuuk-peex.foroactivo.com/t178-tratamiento-termico-del-acero>